オーディオ用オペアンプをドライブ回路に使用した出力4W全段直結構成

C3mプッシュプル ハイブリッドパワーアンプ

岩村保雄　IWAMURA Yasuo

オペアンプを真空管アンプのドライブ回路に使う試みは，これまでもいろいろと行われてきたが，最大出力電圧やスルーレートがオーディオ用には不十分で満足な結果は得られなかった．最近ではオーディオ用高性能オペアンプが出回るようになった．そこでオーディオ用オペアンプと，高感度5極管C3mを組み合わせてプッシュプルパワーアンプを構成した．今回の試みは，オペアンプの駆動力が高く，グリッドをプラス領域まで振ることができて，想定以上の出力が得られた．

はじめに

オーディオ用高性能オペアンプは，CDプレーヤーを始めとして多くのオーディオ機器に使われているので，真空管パワーアンプといっても，システムとしては好むと好まざるとにかかわらずオペアンプのお世話になっています．

このような現代的なデバイスのオペアンプと，レジェンドとでもいうべき真空管を組み合わせて，製作の容易な高性能パワーアンプを作ろうというのが今回のテーマです．

これまでもオペアンプを真空管アンプのドライブ段に使えないかと考えてきました．ときどきインターネットのサイトを覗いてみると，腕に覚えのある方がオペアンプと真空管を組み合わせたハイブリッドアンプを製作しているようです．それらの多くは小出力アンプですが，技術的にはとても面白く，これからの可能性に期待が持てます．

1970年代に汎用オペアンプの741が登場すると，これを真空管アンプの初段に使う試みが次々と行われ，本誌にも発表されてきました．しかし，741はスルーレートも周波数帯域も狭く，性能がオーディオ用には不十分だったので，そのような試みは次第に消えていってしまいました．

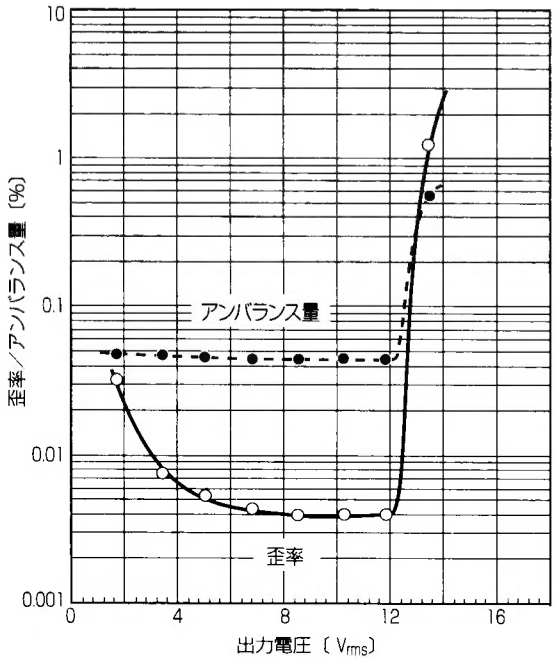
現在ではオーディオの分野にオペアンプがどんどん使われるようになり，改めてオーディオ用高性能オペアンプのスペックシートを見ると，歪率や周波数特性には目を見張るものがあります．ただし，真空管パワーアンプに使う上では，オペアンプの最大振幅が電源電圧の制限から限られているので，フ

［表1］真空管C3mの定格と動作例

項　目			C3m	
フィラメント電圧	E_f	〔V〕	20	
フィラメント電流	I_f	〔A〕	0.125	
最大定格（設計中心）				
プレート電圧	E_p	〔V〕	300	
プレート損失	P_p	〔W〕	4	
スクリーン電圧	E_{g2}	〔V〕	300	
スクリーン損失	P_{g2}	〔W〕	1	
動　作　例			シングル動作	
			5結	3結
プレート電圧	E_p	〔V〕	220	220
スクリーン電圧	E_{g2}	〔V〕	150	220
バイアス電圧	$-E_{g1}$	〔V〕	5	9
内部抵抗	r_p	〔kΩ〕	250	2.5
相互コンダクタンス		〔mA/V〕	6.5	7.2
負荷抵抗	R_i	〔kΩ〕	10	
プレート電流	I_p	〔mA〕	16	18.5
スクリーン電流	I_{g2}	〔mA〕	3.2	
最大出力（歪率10%）	P_O	〔W〕	1	

［表2］ドライブ段に使用したオーディオ用オペアンプの特性

項　目		LME49860NA	NJM2114DD
電源電圧	〔V〕	±2.5～±22	±2.5～±22
最大出力電流	〔mA〕	±26	±60
オープンループ利得	〔dB〕	140	104
スルーレート	〔V/μs〕	±20	±15
GB積	〔MHz〕	55	13
入力バイアス電流	〔nA〕	10	10
入力オフセット電圧	〔mV〕	0.1	0.2
入力換算雑音20Hz～20kHz	〔μV〕	0.34	0.9
THD＋*N*　600Ω	〔%〕	0.00003	0.0005



［図2］オペアンプを使ったドライブ段の歪率とアンバランス特性（1kHz）

幅度が大きいものは高精度の抵抗が必要になるので実用的ではありません．それよりも，オペアンプは安価・小型なので，機能を分離して製作したほうがシンプルで製作も容易です．もちろん，電圧増幅段の－入力端子にアンプ出力端子からオーバーオールのNFBを掛けることができます．

増幅段には低雑音でオープン利得の大きいLME49860を，また，位相反転段には最大出力電流の大きいNJM2114を使います（表2）．NJM2114の最大出力電流±60mAという値は真空管を使ったトランスドライブ，あるいはカソードフォロワー直結でも不可能に近く，最大出力電圧が限られるにしても，オペアンプを使った簡単な回路の位相反転段で可能なことが驚きです．

直結アンプは個別部品で組んだ場合，多量のオフセット電圧や温度ドリフトで直流帰還を掛けないと実用になりませんが，ここではオペアンプを使うので，そのような心配をする必要はなく，出力トランスまではカップリングコンデンサーを排除して直結回路とします．

実際には入力オフセット電圧（0.1mV）×増幅率（34倍）と，入力バイアス電流（10nA）×ボリュームの抵抗値（100kΩ）による出力オフセット電圧が発生するはずで，それぞれがおおよそ3.4mV，1mVと見積もられます．

実際に測定すると4mV前後で，ボリュームを絞るに従って小さくなるという，ほぼ予想された結果となりました．この程度のオフセット電圧なら，出力段のバイアス電圧（8.8V）と比べて十分に小さく，問題になりません．

オペアンプによるドライブ段の特性を測定した結果を図2に示します．オペアンプの最大出力電圧は電源電圧±20Vではスペックから$37V_{p\text{-}p}$なので，実効値では$13V_{rms}$となり，歪率特性の急増している電圧と一致しています．また，ピーク電圧はC3mのバイアス電圧の2倍で，余裕をみた当初の想定通りとなっています．

歪率は実装上の問題なのか，表2のスペックからは1桁近く悪いのですが，アンプ全体から見れば十分満足できる値です．さらにいえば，真空管を使った初段，ドライブ段単独でこのような低い歪率は一般には不可能でしょう

さらに注目するのは位相反転段としての性能で，最大振幅までアンバランス量が無調整で0.05%以下となっていることです．このアンバランス量は回路を見てわかるように，下側のNJM2114の2本の抵抗によって決まります．ここには誤差1%のものを使っていますが，同一ロットのためか，抵抗値がこの程度の小さな誤差で収まったと思われます．

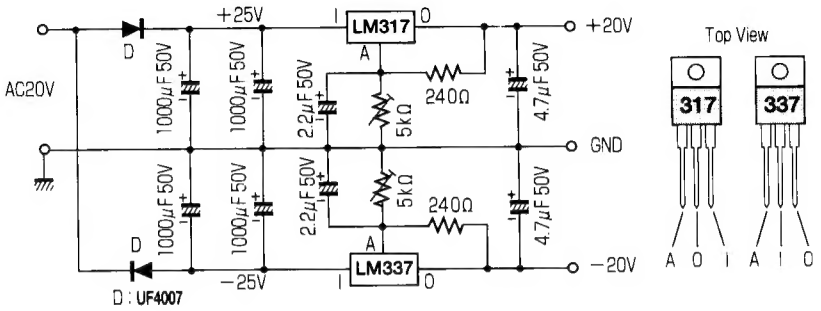
周波数に関しても優秀で，10Hz～100kHzで－0.1dB以内と，アンプとしての全帯域でフラット，位相反転のアンバランス量は1kHzでの0.05%が，高域で若干悪化するといっても20kHzで約0.1%，100kHzでもわずか0.3%です．

オペアンプ用の電源には最大定格の±22Vに近い，なるべく大

きな電圧が欲しいのですが，使うことのできる巻線としてはC3mのヒーター電圧の20V（6.3V×3）しかありません．本来はハム対策として中点を接地したいところですが，この巻線から片側接地して倍電圧整流でオペアンプの電源を作ることにしました．整流後では±25Vが得られたので，これを可変3端子レギュレーターで安定化しました．ここでは，＋電源にLM317，－電源にLM337を使っています．これらのレギュレーターICは入出力間の電圧差として最小3Vが必要なので，余裕を見てオペアンプ用の電源として±20Vとしました（図3）．

整流用ダイオードはスパイクノイズの非常に小さいファーストリカバリーを使いましたが，電圧降下が小さくてノイズレスのショットキーダイオードもよいでしょう．

全段直結のC3mプッシュプルハイブリッドパワーアンプの全回路を図4に示します．



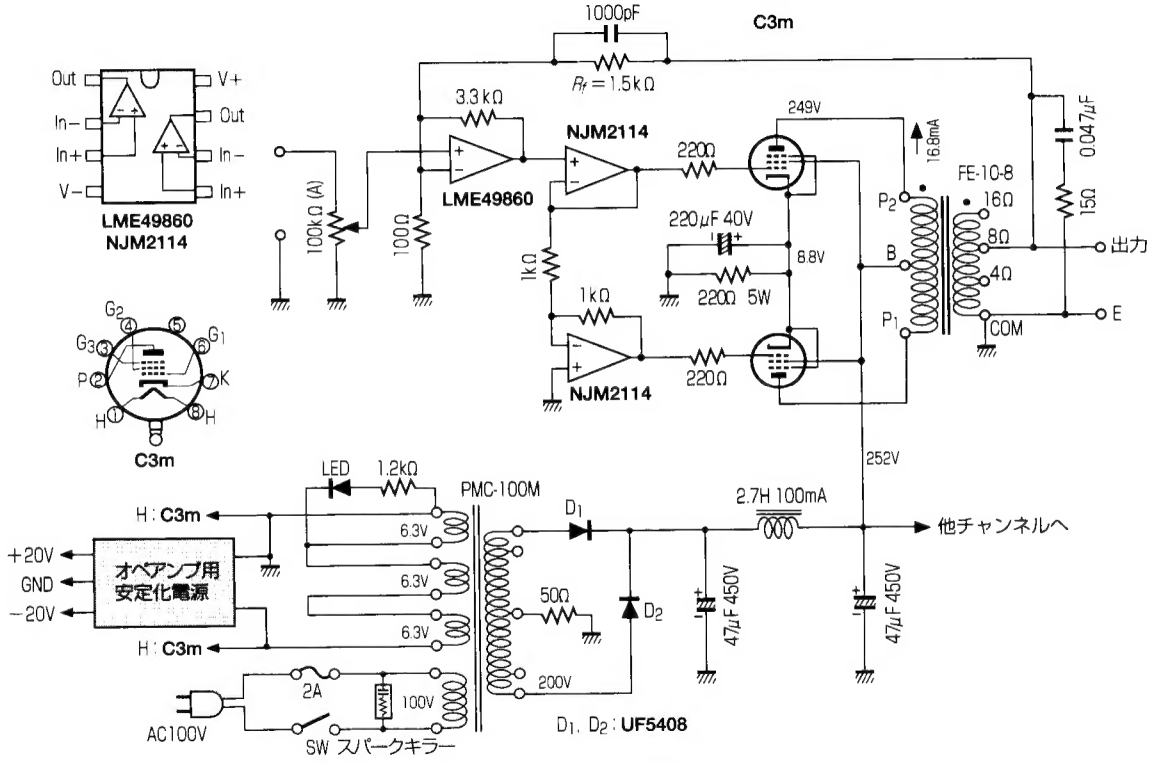
［図3］オペアンプ用±20V電源回路

本機のNFB量は測定とヒアリングから少なめに設定してあります．最終的に決定した10.5dBは3極管アンプと比べれば多いようですが，5極管動作ではかなり控えめのNFB量と考えています．

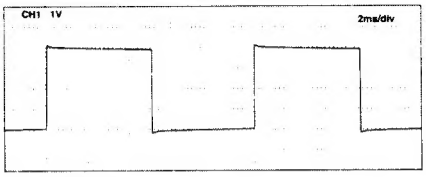
負帰還抵抗R_fと並列に接続した位相補償の容量1000pFは方形波の応答波形から決めています．さらに，出力オープンあるいは容量性負荷時の安定性確保のために出力端に0.047μFと15Ωをつないでいます．

コンデンサーを省いて全段直結でアンプを構成するためには，カソードバイアスのバイパスコンデンサーも使いたくないのですが，アンバランス-バランス変換回路に，固定バイアス分の電圧をシフトする余裕はなく，ここではC3mを自己バイアスで働かせています．バイアスの深さはカソード抵抗を220Ωとして8.8Vとしました．なお，コントロールグリッドに直列に入っている220Ωは発振止めです．

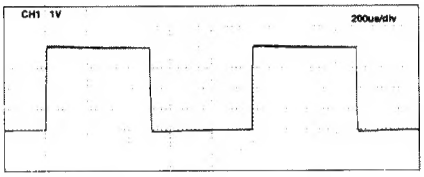
C3mによるプッシュプル出力段の電源はファーストリカバリーダイオードを使ったダイオード整流，平滑回路はインダクタンスが



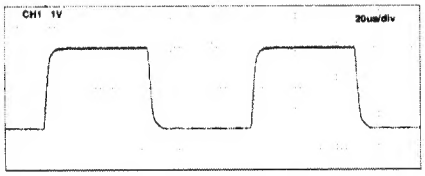
［図4］C3mプッシュプルハイブリッドパワーアンプの全回路図



(a) 100Hz

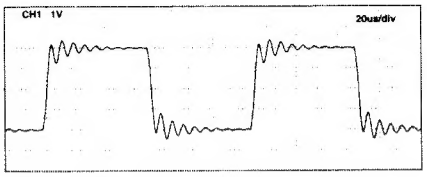


(b) 1kHz

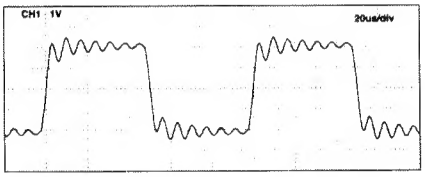


(c) 10kHz

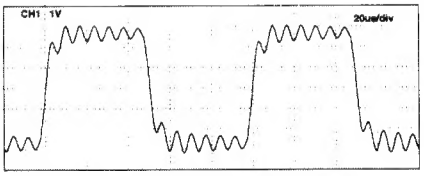
［図11］8Ω純抵抗負荷方形波応答



(a) 8Ω//0.22μF



(b) 8Ω//0.47μF



(c) 0.47μFのみ

［図12］容量性負荷時の10kHz方形波応答

の最大出力は歪率10%で1Wとなっているので，プッシュプル動作の本機ではC3mをかなり効率的に使っていることになります．

通常の聴取レベルである出力0.1Wでの歪率は約0.03%（1kHz）でした．これは位相補償として高域の利得を落としたことによるホワイトノイズの減少が効いているようで，NFBがオーバーオールの10.5dBだけの5極管接続のアンプとしては，かなり低歪率となっています．

8Ωの無誘導抵抗を負荷としたときの100Hz，1kHz，10kHzの方形波応答波形を図11に示します．100Hzの応答波形にサグが見られないことから，低域まで周波数特性が伸びていることがわかります．また，10kHzの波形はリンギングも見られず，わずかに角が丸まっているだけなので，高域まで素直に伸びていることがわかります．

本アンプはオーバーオールではNFBを10.5dBしか掛けていませんが，ドライブ段はフラットでもNFBのループの中に出力トランスが入っているので，負荷が容量性となった場合に動作が不安定になる可能性があります．そこで，動作の安定性を確認するという意味で，出力端子に8Ωと0.22μF，8Ωと0.47μFを並列接続したときの10kHzの方形波応答波形を観測しました（図12（a），（b））．この場合には若干のリンギングが見られます．さらに負荷を0.47μFのみとした場合が図12（c）で，リンギングが気になりますが発振に至ることはなく，通常の使用では問題となることはありません．

試聴とまとめ

このアンプの完成後，早速いろいろなCDを聴いてみました．正直いって，オペアンプが真空管アンプのドライバーとして使えるのか？　という試みでもあったので，あまり大きな期待はしていませんでした．ところが鳴らしてみるとワイドレンジだし，小さいくせにダイナミックな音を聴かせてくれます．中域重視でボーカルが得意という聴かせ方ではなく，CDに入っている音を生真面目に曝け出すという方向です．

試聴したCDで気に入ったものを2つ挙げておきます．ニッキー・パロットの『Black Coffee』（VHCD-1041）では，1曲目の初めに演奏されるパワフルなベースはクリップ感なしで楽々再生，2曲目のタイトル曲ではちょっとハスキーなパロットのボーカルを聴くことができます．

また，シュタルケルとルージチコヴァ『J.S.Bach:チェロソナタ』（COCO-70745）はチェンバロの繊細な高音部を爽やかに再生，チェロとの音質的なバランスも室内楽を聴くのに最良です．チェロソナタの結果は，特性を測定したときから予想していましたが，パロットのCDでのパワフルさは予想外の結果でした．

今回の初段と位相反転段をオペアンプで構成する直結ハイブリッドアンプの試みは，考えていた以上にうまくいったようです．オペアンプの駆動力が高いので，グリッドをプラス領域にまで振ることができ，想定以上の出力が得られました．適切な出力管を使えば20W以上の高出力アンプを簡単に製作できそうです．しかし，問題点がないわけではありません．自己バイアス動作としたため，出力の増加とともにAB_1級からほぼB級にまで動作点が動いてしまいます．固定バイアスでの動作，あるいは動作点が変わらない工夫を検討する必要があるようです．

試聴はCDプレーヤー：DCD S10Ⅲ-L，自作ラインアンプ（未発表），スピーカー：アルテック604-8Hのウーファー＋アルテック802D/811Bホーン＋GOTO SG17sで行っています．